

Simulation de la mise en forme et de la tenue mécanique de pièces obtenues par semi-découpe.

J.M. Gachet^{1,2}, G. Delattre², P.O. Bouchard¹.

¹ Centre de Mise en Forme des Matériaux, MINES-ParisTech, UMR CNRS 7635, France.

² Faurecia Automotive Seating, France.

Résumé — Le procédé de semi-découpe de tôles d'acier est utilisé pour la mise en forme de composants de sièges d'automobiles. La tenue mécanique sous sollicitation radiale de pièces semi-découpées est étudiée par la réalisation d'essais de mise en forme et d'arrachement. La réponse des pièces aux sollicitations est prédite par simulation numérique. La prise en compte de la mise en forme dans la simulation de l'arrachement entraîne un gain de rigidité en adéquation avec l'expérience. La rupture des pièces intervient dans une zone de faible triaxialité.

Mots clefs — semi-découpe, tôles épaisses, endommagement ductile, simulation numérique.

1 Introduction

Le réglage de l'inclinaison du dossier par rapport à l'assise des sièges d'automobiles est réalisé par une articulation. Ce mécanisme, montré figure 1-a, est constitué d'un ensemble de pièces dont les flasques obtenus par semi-découpe de tôles d'acier. Les articulations garantissent la tenue des sièges en cas de choc du véhicule avec un obstacle. Elles ont un rôle de sécurité. En cas de choc, les reliefs semi-découpés sont sollicités par les autres pièces du mécanisme comme le montrent les flèches bleues sur la figure 1-b.

Les procédés de mise en forme influent sur le comportement mécanique des pièces obtenues [1]. Lors de l'opération de semi-découpe, la matière est soumise à d'importantes déformations localisées [2]. L'utilisation d'un jeu négatif entre le poinçon et la matrice permet de limiter l'endommagement lors du formage [3]. Le travail présenté ici étudie la tenue mécanique sous chargement radial d'éprouvettes semi-découpées. Dans un premier temps, deux essais de laboratoire, reproduisant les mécanismes rencontrés dans les cas industriels, sont conçus. Des éprouvettes de tôle épaisse sont mises en forme par semi-découpe puis sollicitées par un essai d'arrachement. Dans un second temps, la mise en forme et l'arrachement sont simulés.

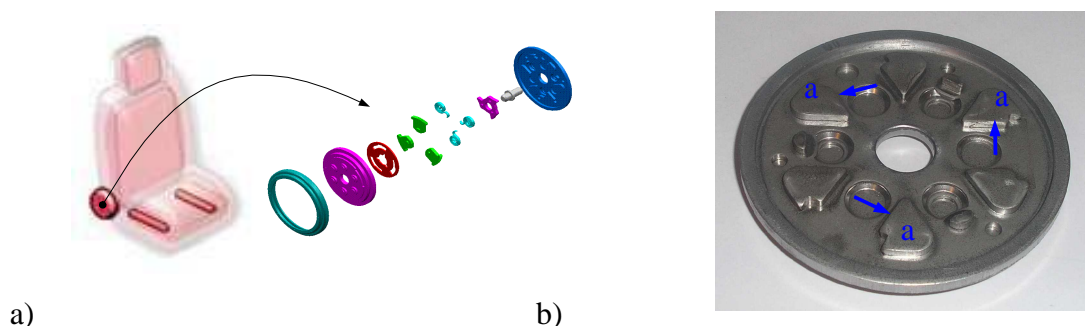


Fig. 1 – a) Articulation de sièges d'automobiles. b) Exemple de flasque. En cas de choc du véhicule, les reliefs **a** sont sollicités par les autres éléments du mécanisme symbolisés par les flèches bleues.

2 Expérimentations et modèles de simulation

2-1 Essais de semi-découpe et d'arrachement

Pour étudier les phénomènes mis en jeu et obtenir des observables pour valider la simulation numérique, deux essais de laboratoire sont mis en place. Le premier, montré figure 2-a, est la semi-découpe d'un relief de géométrie simple (poinçon et matrice cylindriques). Le montage expérimental est montré figure 2-b. Les diamètres du poinçon et de la matrice sont respectivement de 10mm et 9,9mm. Il en résulte un jeu radial $j=-0,05\text{mm}$. Ce dernier a une forte influence sur l'évolution de l'endommagement dans les zones semi-découpées [3]. Pour assurer son respect, les poinçon et matrice sont centrés dans des alésages et les parties haute et basse du montage sont guidées en translation par un montage hyperstatique de 4 douilles à billes. Un dispositif permet d'appliquer un effort de serre-flan. Les éprouvettes sont en tôle d'acier à haute limite élastique de 3,5mm d'épaisseur. La hauteur du relief semi-découpé est de 2,3mm.

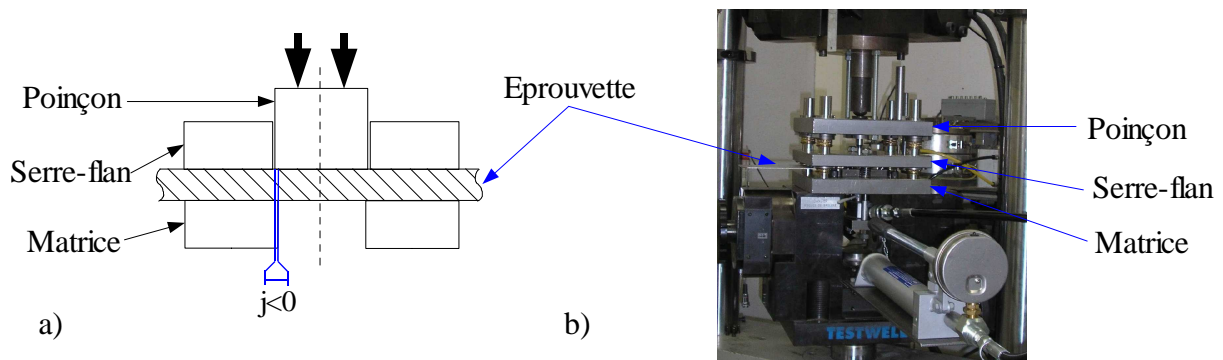


Fig. 2- a) Principe de l'essai de semi-découpe. b) Montage de semi-découpe.

La seconde manipulation est la sollicitation des reliefs obtenus par un essai d'arrachement présenté figure 3-a. Le montage expérimental, montré figure 3-b, est constitué de deux platines parallèles. Celle de droite est munie d'une cisaille qui permet la sollicitation du relief semi-découpé lors de la translation vers le haut de l'éprouvette. Les platines forment une structure fermée équipée de roulements à rouleaux cylindriques assurant le guidage sans flexion de la tôle. La distance entre la tôle et la cisaille est fixée à la hauteur $ha=1\text{mm}$.

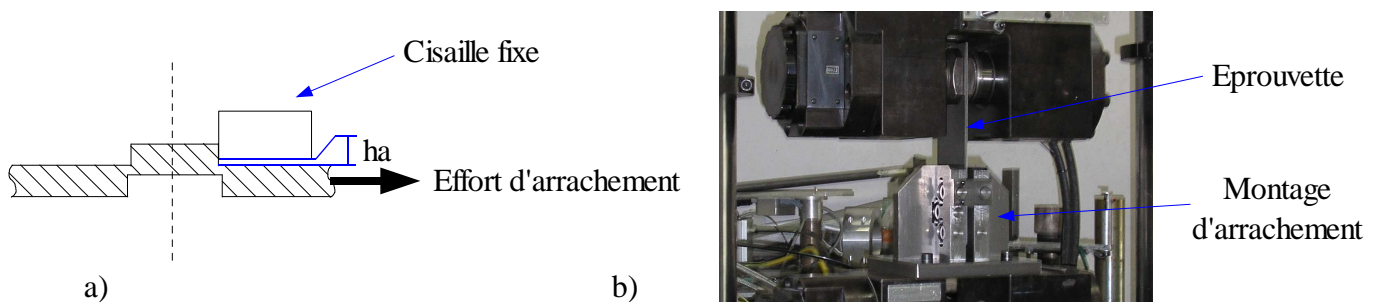


Fig. 3 – a) Principe de l'essai d'arrachement b) Montage d'arrachement.

Les montages sont mus par une machine de traction/compression. Cette dernière permet d'imposer les déplacements et d'enregistrer les efforts au cours de la mise en forme et de l'arrachement. Ce dispositif expérimental permet de reproduire en laboratoire les mécanismes mis en jeu sur les pièces industrielles.

2-2 Modèle de simulation

Le matériau utilisé est une tôle d'acier à haute limite élastique. La plasticité est modélisée par une loi d'écrouissage isotrope. La relation entre la contrainte équivalente de von Mises σ_e et la déformation plastique cumulée ϵ_{pl} est donnée par l'équation (1) où K , ϵ_0 et n sont des paramètres matériau.

$$\sigma_e = \sqrt{3} K (\epsilon_0 + \bar{\epsilon}_{pl})^n \quad (1)$$

L'endommagement est modélisé par un modèle de Lemaitre modifié [1], [4]. Une variable d'endommagement scalaire D est définie par l'équation (2) où S_0 , b et ϵ_d sont des paramètres matériau. T est le taux de triaxialité des contraintes défini par l'équation (3).

$$\dot{D} = \left(\frac{Y}{S_0} \right)^b \dot{\epsilon}_{pl} \quad \text{si } \epsilon_{pl} \geq \epsilon_d \text{ et si } T > -1/3 \quad (2)$$

$$\dot{D} = 0 \quad \text{si } \epsilon_{pl} < \epsilon_d \text{ ou si } T < -1/3$$

$$T = -\frac{P}{\sigma_e} \quad \text{avec } P \text{ la pression hydrostatique } P = -\frac{1}{3} \text{tr}(\sigma) \quad (3)$$

Le taux de restitution d'énergie élastique Y est défini par l'équation (4), où h est un paramètre caractérisant la prise en compte de la refermeture de fissures en compression, σ_i les contraintes principales maximales et e_i les directions principales du tenseur des contraintes.

$$Y = \frac{1}{2E(1-D)^2} ((1-\nu)\sigma_+ : \sigma_+ - \nu \langle \text{tr}(\sigma) \rangle^2) + \frac{h}{2E(1-hD)^2} ((1-\nu)\sigma_- : \sigma_- - \nu \langle -\text{tr}(\sigma) \rangle^2) \quad (4)$$

$$\text{où } \sigma_+ = \sum_{i=1}^3 \langle \sigma_i \rangle e_i \otimes e_i \quad \sigma_- = \sum_{i=1}^3 \langle -\sigma_i \rangle e_i \otimes e_i$$

L'endommagement est couplé à la plasticité en remplaçant la contrainte par la contrainte effective définie par l'équation (5) dans les modèles de comportement du matériau non endommagé.

$$\tilde{\sigma} = \frac{\sigma}{1-hD} \quad (5)$$

Pour modéliser la rupture du matériau, les éléments pour lesquels D est supérieure à la valeur d'endommagement critique D_c sont supprimés par une méthode de "Kill element".

Les paramètres du modèle d'écrouissage, reportés dans le tableau 1, sont identifiés par analyse inverse à partir d'essais de traction. Les paramètres du modèle d'endommagement de Lemaitre, reportés dans le tableau 1, sont identifiés par analyse inverse d'essais de traction sur éprouvettes plates, sur éprouvettes plates entaillées et sur éprouvettes à cisaillement induit. L'utilisation de trois essais différents, permet d'identifier les paramètres du modèle d'endommagement pour des valeurs de triaxialité des contraintes différentes.

K (MPa)		ϵ_0		n	
505		0,05		0,22	
S_0	b	ϵ_d	D_c	h	
3,57	4,61	0,15	0,15	0,2	

Tab 1 – Paramètres des modèles de comportement.

Les courbes effort-déplacement expérimentales et issues de simulation sont montrées figure 4.

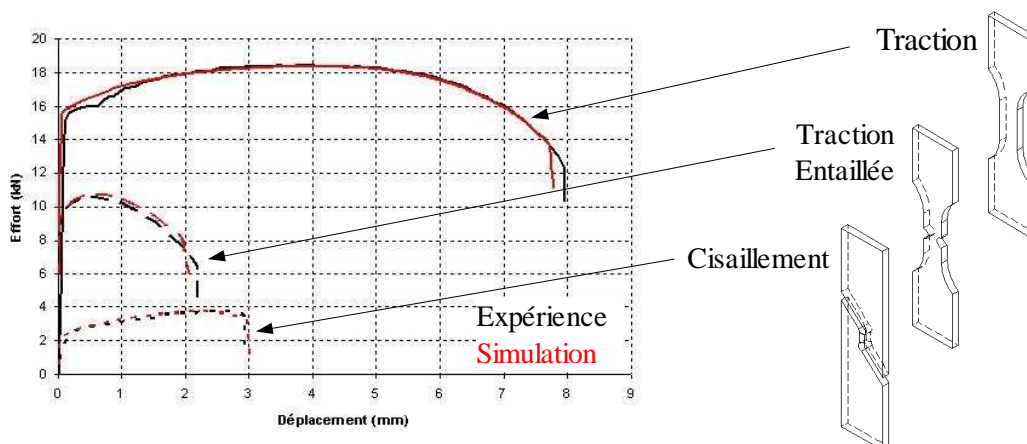


Fig. 4 – Courbes effort-déplacement expérimentales (noires) et issues de calculs (rouges).

Au cours de la semi-découpe et de l'arrachement, de grandes déformations locales sont rencontrées (voir figure 6-b). L'utilisation du remaillage automatique et du transport de champs est nécessaire pour limiter la distorsion des éléments et mener les calculs à terme [2]. Cela est permis par l'utilisation du code de calcul Forge®. Les éléments utilisés sont des tétraèdres P1+/P1 avec une formulation mixte vitesse-pression. Pour s'affranchir du phénomène de localisation, la taille de maille est fixée pour l'ensemble des calculs à 0,2mm. Les calculs sont réalisés en trois dimensions et les outils sont considérés comme rigides.

La mise en forme est d'abord simulée. Le maillage et les champs physiques associés sont utilisés pour simuler l'arrachement avec prise en compte de la mise en forme. Pour les simulations d'arrachement ne prenant pas en compte la mise en forme, seul le maillage est utilisé. Les variables d'état sont alors réinitialisées à zéro.

3 Tenue mécanique des pièces semi-découpées

3-1 Géométrie et mode de rupture

Après mise en forme des éprouvettes, des essais d'arrachement jusqu'à rupture complète (soit plus de 5,3mm de déplacement) et un essai d'arrachement interrompu (soit $d=3,8$ mm de déplacement) sont réalisés. Le jeu entre le plan de la tôle et la cisaille est fixé à $ha=1$ mm. Les éprouvettes avant et après arrachement sont montrées figure 5-a. Dans cette configuration, la rupture intervient dans le plan de la tôle comme le montre la géométrie résultante après arrachement complet.

L'éprouvette issue de l'essai interrompu est coupée puis polie selon le plan de symétrie. Le profil, relevé sur un cliché obtenu à la loupe binoculaire, est montré sur la figure 5-c (courbe noire). Les distances dm et hm sont mesurées ($dm=3,6$ mm et $hm=1,14$ mm). Les écarts $d-dm$ et $ha-hm$ illustrent la bonne rigidité du montage qui, malgré les jeux fonctionnels et l'élasticité des matériaux, reste contenue ($(d-dm)/dm < 3\%$ et $(ha-hm)/hm < 14\%$).

Après simulation de la mise en forme, l'arrachement est simulé. Seule l'éprouvette est considérée comme déformable. Ainsi le jeu entre la tôle et la cisaille est porté à $hm=1,14\text{mm}$ de manière à ce que le modèle de simulation soit proche de la réalité. La figure 5-b montre la géométrie obtenue après simulation de l'arrachement. Le mode de rupture obtenu en simulation est conforme au mode de rupture expérimental. La figure 5-c compare les profils issus de mesures (noire) et issus de simulation (rouge). L'écart est inférieur à $0,5\text{mm}$.

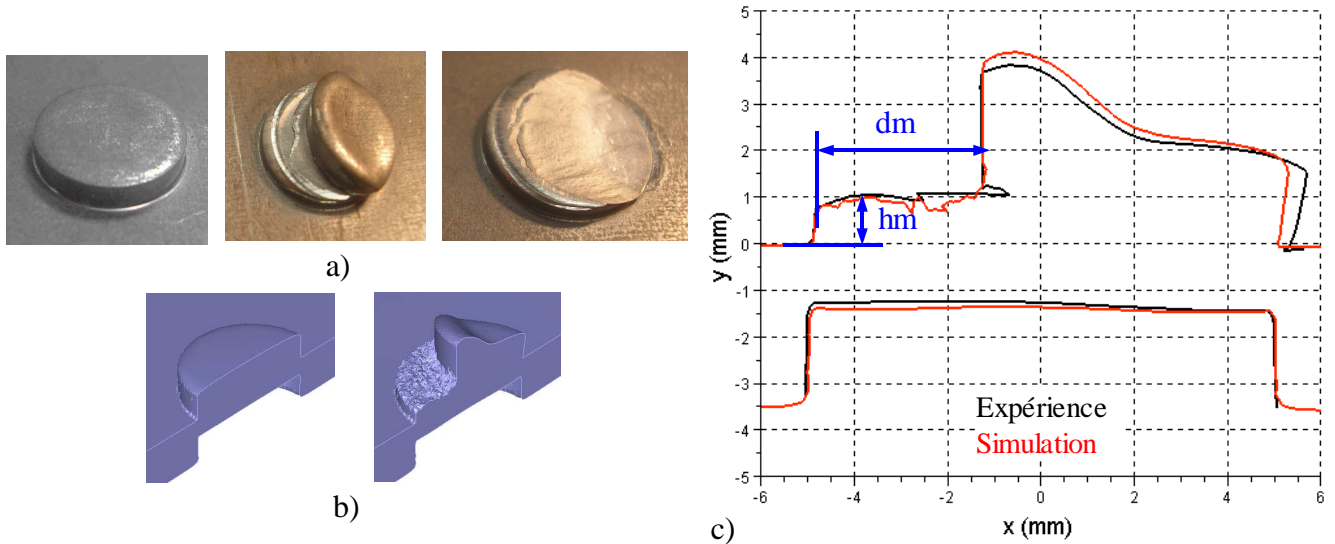


Fig. 5 – a) Éprouvettes après essai de semi-découpe, d'arrachement interrompu et d'arrachement complet. b) Géométries issues de simulation de la semi-découpe et de l'essai d'arrachement interrompu. c) Comparaison des profils issus de l'expérience et de la simulation.

3-2 Rigidité et effort d'arrachement

Au cours des essais d'arrachement, l'effort en fonction du déplacement est enregistré. La raideur R du montage d'arrachement est approximée par l'équation (5), où F est l'effort mesuré à la fin de l'essai d'arrachement interrompu ($F = 16,4 \text{ kN}$). Cette raideur est utilisée pour corriger le déplacement mesuré.

$$R = \frac{d - dm}{F} = 0,0122 \text{ mm} \cdot \text{kN}^{-1} \quad (5)$$

La courbe effort-déplacement obtenue pour l'arrachement interrompu est montrée figure 6-a. Sur cette figure sont aussi reportées les courbes effort-déplacement issues de simulations obtenues en prenant en compte ou non la mise en forme. La prise en compte de la mise en forme permet une meilleure estimation de la rigidité de la pièce. Pour un effort de 10kN , l'erreur en déplacement est réduite de 120% . Cette meilleure estimation de la rigidité est due à l'écrouissage important que subit la pièce au cours de la semi-découpe comme le montre la figure 6-b.

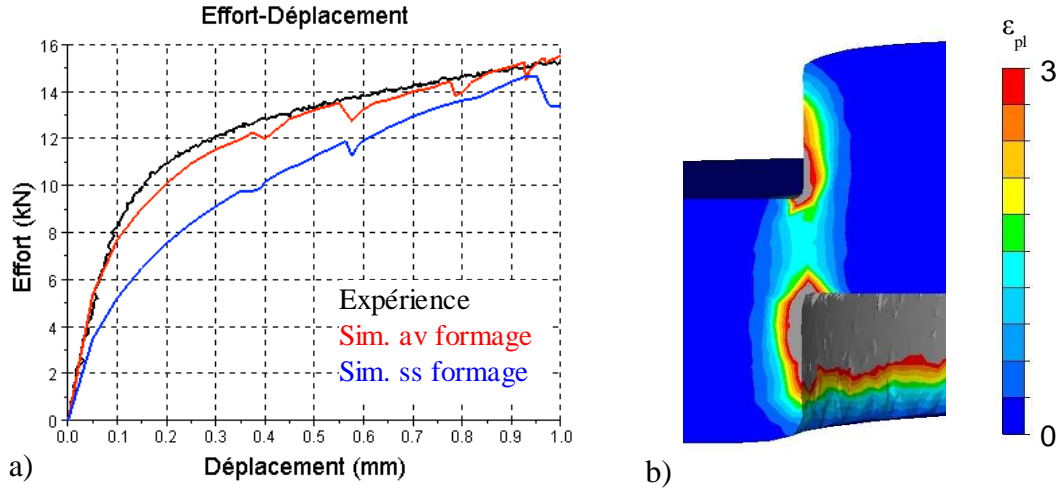


Fig. 6 – a) Courbes effort-déplacement correspondant à l'essai interrompu (noire) et aux simulations avec ou sans prise en compte de la mise en forme (courbes rouge et bleue respectivement). b) Déformation plastique cumulée après mise en forme.

Les courbes effort-déplacement correspondant à l'essai et à la simulation d'arrachement complet sont montrées figure 7-a. L'écart entre l'effort d'arrachement maximal issu de simulation et celui mesuré expérimentalement est de 12%. La perte totale de rigidité, mesurée expérimentalement après 5,3mm de déplacement, n'est pas observée sur les résultats de simulation numérique. La figure 7 montre un faible endommagement en front de cisaille alors qu'on observe expérimentalement une fissure macroscopique comme le montre la figure 7-b. Ce faible endommagement conduit à une surestimation des efforts d'arrachement.

Les figures 7-d, 7-e montrent que la triaxialité des contraintes et l'angle de Lode θ_L , défini par l'équation (6), sont proches de zéro dans la zone de rupture expérimentale.

$$\theta_L = \frac{\pi}{6} - \theta \quad \text{avec} \quad \cos(3\theta) = \left(\frac{r}{\sigma_{eq}}\right)^3, \quad r = \left(\frac{27}{2} \det(S)\right)^{\frac{1}{3}} \quad \text{et} \quad S = \sigma - P I \quad (6)$$

Les valeurs prises par ces deux grandeurs montrent un état de contrainte en cisaillement [5]. Cet état de contrainte est en accord avec l'observation expérimentale de la surface de rupture montrée figure 7-b. Le caractère allongé et la faible présence de cupule révèlent une rupture en cisaillement. La faible triaxialité met en défaut le modèle de Lemaitre [6]. Ainsi, la rupture n'est pas prédite dans la zone de cisaillement, malgré le niveau important de déformation plastique atteint (figure 7-d). Les lois matériau utilisées permettent de bien modéliser les essais mécaniques présentés figure 4, mais ne permettent pas de représenter précisément le mécanisme de rupture en cisaillement observé expérimentalement sur les essais d'arrachement.

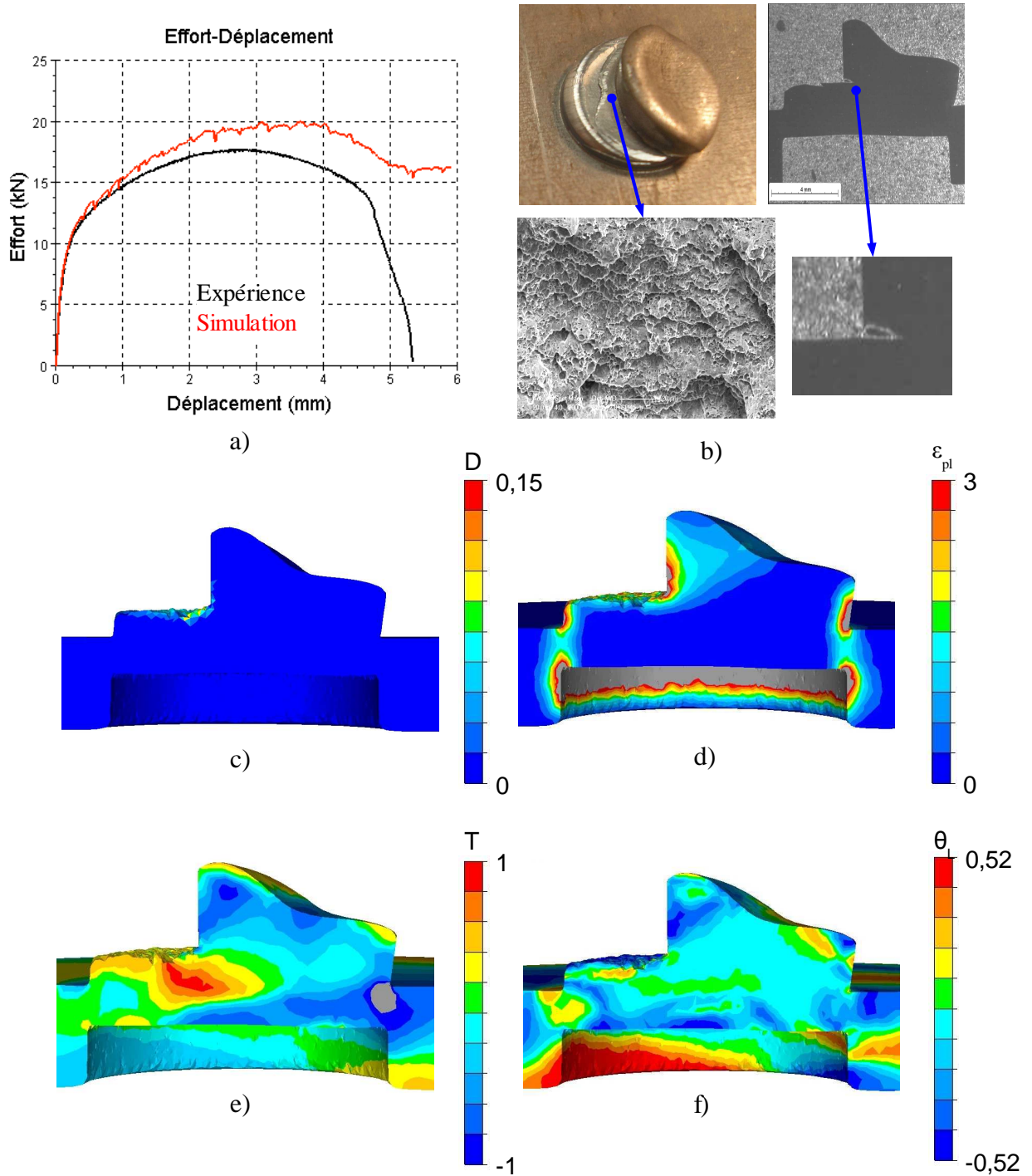


Fig. 7 – a) Courbes effort-déplacement correspondant aux essais (courbe noire) et simulation (courbe rouge) d'arrachement complet. b) Observation de la surface de rupture au microscope électronique à balayage et observation d'une fissure macroscopique en front de cisaille dans le cas de l'essai interrompu. c) d) Endommagement et déformation plastique pour un déplacement de 3,6mm. e) f) Triaxialité des contraintes et angle de Lode pour un déplacement de 3,6mm.

4 Conclusion

La sollicitation radiale de pièces semi-découpées est étudiée. Des dispositifs expérimentaux permettent de mettre en forme des éprouvettes de géométrie simple puis de les solliciter avec un essai d'arrachement. Ces deux essais sont simulés et la mise en forme est prise en compte ou non lors de l'arrachement. Les essais sont simulés en utilisant une loi élastoplastique endommageable. Les paramètres des lois de comportement sont identifiés sur la base de trois essais mécaniques différents faisant varier la triaxialité et l'angle de Lode. Les éléments suivants ressortent de cette étude :

- dans la configuration présentée ici, le mode de rupture des pièces semi-découpées intervient selon le plan de la tôle;
- la prise en compte de la mise en forme pour la simulation de la tenue mécanique permet d'améliorer la prédiction de la rigidité des pièces;
- la prise en compte de l'endommagement est nécessaire pour prévoir l'effort maximal d'arrachement et la rupture totale de la pièce;
- dans la configuration présentée ici, le modèle de Lemaitre, ne permet pas de rendre compte des observations expérimentales.

Dans le modèle de Xue [5], l'évolution de l'endommagement est une fonction non symétrique de la pression et permet de différencier l'état de cisaillement avec une dépendance à l'angle de Lode. Ce modèle semble ainsi adapté à la problématique soulevée ici. Des essais de cisaillement sous triaxialité égale et inférieure à zéro sont en cours de conception afin de pouvoir étudier la rupture sous ces états de contrainte et de permettre l'identification des paramètres du modèle de Xue. Par ailleurs, si une modélisation satisfaisante des mécanismes de rupture semble la principale problématique pour obtenir des résultats de simulation plus proches des résultats expérimentaux, il est important de noter que la rupture intervient dans le plan de la tôle qui, de part le procédé de laminage, montre une anisotropie.

Remerciement

Cette étude est menée en partenariat avec l'équipementier automobile Faurecia Automotive Seating.

Références

- [1] P.O. Bouchard, L.Bourgon, S. Fayolle et. al, *An enhanced Lemaitre model formulation for materials processing damage computation*, International Journal of material forming, Springer, 2010. DOI 10.1007/s12289-010-0996-5
- [2] P.F. Zheng, L.C. Chan, T.C. Lee, *Finite-element analysis of a combined fine-blanking and extrusion process*, International Journal for Numerical Methods in Engineering 66, Wiley, 404-430, 2006.
- [3] W.F. Fan, J.H. Li, *An investigation on the damage of AISI-1045 and AISI-1025 steels in fine-blanking with negative clearance*, Material Science and Engineering A 499, Elsevier, 248-251, 2009.
- [4] J Lemaitre, J.L. Chaboche, *Mécanique des matériaux solides*, Dunod, Paris, 2001.
- [5] L. Xue, T. Wierzbicki, *Ductile fracture initiation and propagation modeling using damage plasticity theory*, Engineering Fracture Mechanics 75, Elsevier, 3276-3293, 2008.
- [6] H. Li, M.W. Fu, J. Lu et. al. *Ductile fracture : Experiments and computations*, International Journal of Plasticity 27, Elsevier, 147-180, 2010.